

南極ニュートリノ検出器 IceCube を用いた地球コアのニュートリノ・ラジオグラフィ

Neutrino Radiography of Earth's Core with IceCube Neutrino Observatory

保科琴代*
HOSHINA Kotoyo

田中宏幸*
TANAKA Hiroyuki

Abstract Neutrino radiography, detecting absorption of neutrinos in dense matter, has been expected as one of the possible direct measurements of density of the core of the Earth. Considering total column depths of the Earth, atmospheric neutrinos with energy over a few ten TeV will be utilized for this purpose. With ten-year data of IceCube neutrino observatory, we are planning to observe 5-sigma separation between PREM model and core-less Earth model. Using one-year data of half-size IceCube, we performed first neutrino radiography for Earth's core. Our PREM-based simulation represents data within the statistic error. The data does not exclude core-less model too, due to the limitation of event-statistics. Using current event selection and analysis, we expect at least one-sigma separation with ten-years of full-size IceCube data. The separation will be improved after we optimize our analysis for full-size IceCube.

Keywords: IceCube, neutrino, neutrino-radiography, Earth-core

1. イントロダクション

地球内部の大深度密度構造を探る研究は、これまで主に地震波測定により行われてきた。地震波を用いた測定では、比較的データが豊富であり密度が精度良く求まるという利点がある反面、密度構造の決定には温度勾配やマントル、コアの化学組成などの地球モデルを仮定しなければならず、密度が独立には求まらないという問題があった。

これに対し、地球コアによるニュートリノの吸収を用いてコア部分の密度情報を得るニュートリノ・ラジオグラフィは、原理的には特定の地球モデルを仮定する必要がなく、ニュートリノの反応断面積のみに依存して密度が特定出来る^{**}。このため、ニュートリノ・ラジオグラフィと地震波測定は互いに相補的な役割を果たすと考えられる。

ニュートリノ・ラジオグラフィを行うには、いくつかの条件を満たす必要がある。まず、ニュートリノは大量に地球に降り注いでいるが、地球コアで吸収される可能性があるものは、それらのうちエネルギーがおよそ 40TeV を超えるものである。地表での大気ニュートリノのエネルギースペクトラムは、エネルギーが上がるにつれ、10 の^{-2.7}乗で数が減少する。このため、実際に計測に用いることが出来るニュートリノは、大気ニュートリノの中でも特にエネルギーの高い一部のみである。

更に、ニュートリノは反応断面積が小さいことから、検出が難しい粒子である。これらを勘案すると、ニュートリノ検出器は少なくともキロ立方メートル単位の検出領域がなくてはならない。南極氷床を用

*東京大学地震研究所 〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1

TEL: (03)5841-5789 E-mail: hoshina@eri.u-tokyo.ac.jp

** 現時点では、条件を満たすニュートリノ検出器が南極の一カ所にしかないため、一次元測定となり、地球の内部密度構造が同心円状であることを仮定する必要がある。この問題は、もう一カ所ニュートリノ検出器を設置し、ステレオ測定をすることによって技術的には解決可能である。

いた大規模ニュートリノ検出器 IceCube は、現時点でこの条件を満たす世界で唯一の検出器であり、これを用いて十年間継続して測定した際に得られるコアの密度と地球平均密度の分離能力は、約5シグマと見積もられている[1]。

本報告では、2008年～2009年に得られた半分のサイズの IceCube (IC40) 1年分のデータを用い、PREMモデル[2]及び地球コアの部分の密度をマントル最下層部と同等にしたモデル (FLATCORE) とデータとをそれぞれ比較したテスト解析について報告する。

2. 解析データ及びシミュレーションの準備

まず、PREMモデル及びFLATCOREモデルを仮定した場合の、IceCubeで検出されるニュートリノイベントのシミュレーションを生成した。それぞれのモデルにおける地球の密度分布を図1に示す。

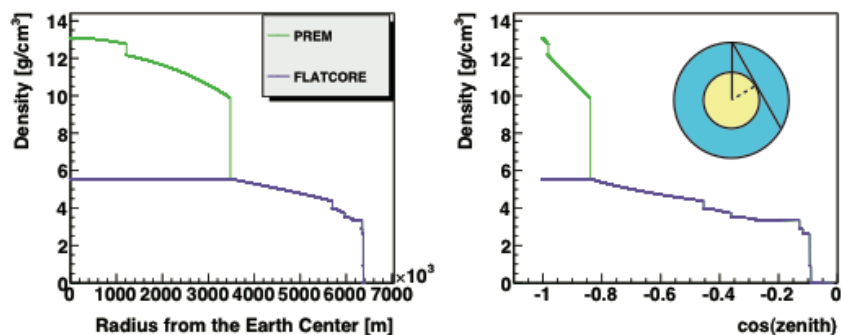


図1 (a) 地球の密度と地球中心からの距離の相関 (b) IceCubeで検出されるニュートリノイベントの天頂角 $\cos(\text{zenith})$ と、ニュートリノの飛跡に接する円状での地球密度の相関

図1(b)に示すように、PREMモデルでは地球コアを通る天頂角は $-1 < \cos(\text{zenith}) < -0.83$ の範囲である。

つぎに、このシミュレーション及び、IceCubeに降り注ぐ大気ミュオンバックグラウンドのシミュレーションを用いて、IceCubeで検出されるイベントから地球内部を通過してIceCubeに到達したイベントを選別するためのフィルターを決定する。このフィルターに生き残ったデータの総数は10588イベントであった。(PREMモデルを用いた)シミュレーションとデータの比較を図2に示す。

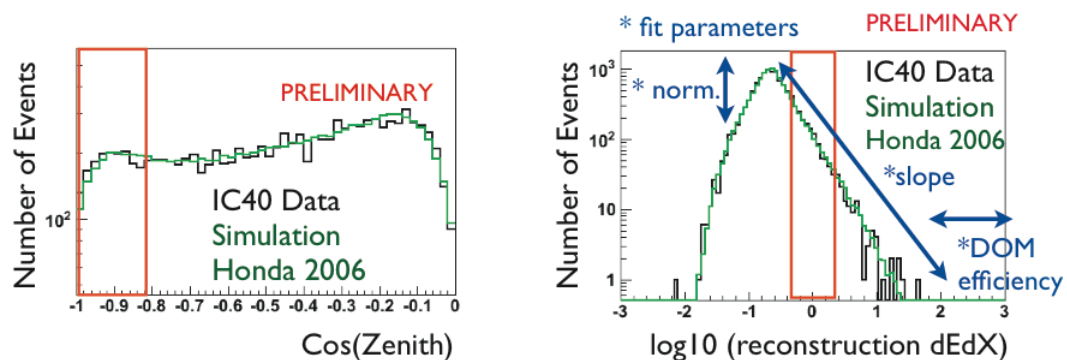


図2 IceCubeで検出される上向きイベント(地球内部を通過して到達したニュートリノイベント)の四ミュレーション及びデータ (a) 検出された天頂角分布 (b) 再構成されたエネルギーパラメータ。緑色の線がシミュレーション。赤の四角内は、それぞれ地球コアに感度のある領域のうち、実際に解析に用いた領域を示す。

図2が示す通り、我々のシミュレーションはデータをよく再現しているが、更に系統誤差を抑えるため、使用した大気ニュートリノモデルの誤差の範囲で Normalization, Slope などのパラメータを変化させ、測定値にフィットする必要がある。ただし、これらのパラメータは地球モデルとも相関があるため、このフィットはコアの部分を除いて行わなければならない。

本研究では、大気ニュートリノモデルの Normalization (n) 及び Slope (γ) (エネルギー分布の高エネルギー側の傾きの、基準値からのずれ)、更に検出器の検出効率の基準値からのずれ (δ) をパラメータとし、大気ニュートリノが検出器近傍で反応して生成したミューオンの再構成エネルギー $-0.3 < \log_{10}(dEdX) < 0.3$ [GeV/m] 及び天頂角 $-0.83 < \cos(\text{zenith}) < 0$ の範囲でフィッティングを行った。

再構成エネルギーの選択範囲の決定は、PREM、FLATCORE のシミュレーションを用い、もっともこれらのモデルの分離能力が高いエネルギー範囲を選別した。

フィットの最適値は、 $n=0.978$, $\gamma=-0.001$ および $\delta=0.998$ であった。

3. 結果

このフィットの最適値を用いて、PREM モデル、FLATCORE モデルのそれぞれについて、ミューオンの再構成エネルギー $-0.3 < \log_{10}(dEdX) < 0.3$ [GeV/m] 及び天頂角 $-1 < \cos(\text{zenith}) < -0.83$ の範囲の検出イベント数を見積もった。推定値とデータを重ねたものを図3に示す。

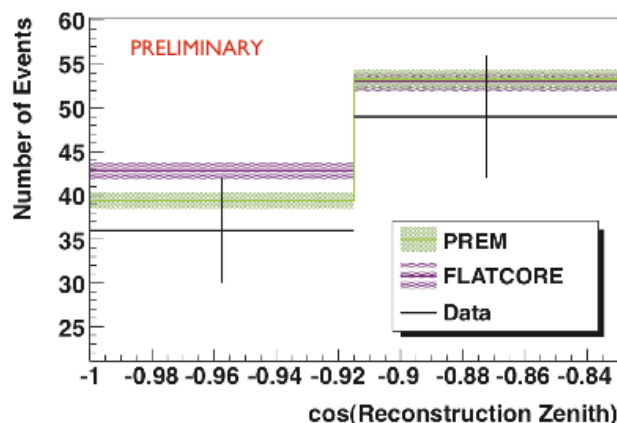


図3 PREM、FLATCORE モデルを用いた地球コアを通る高エネルギーニュートリノイベント数の見積もりとデータ。アミ点部分は、シミュレーションの統計数からくる中央値の統計誤差を示す。データの誤差は、統計誤差のみを含む。

図3が示す通り、今回の解析では、PREM と FLATCORE の差は、もっとも垂直に近い (すなわちもっともコアの密度の高い部分を通る) 軌道で数イベントの差がみられた。この値と IC40 の測定値を重ねると、この数イベントの差は測定値の統計誤差の範囲内であり、従って IC40 を用いた1年間のデータでは地球コアの密度とマントルとの密度の差は検出出来ない。

しかし、今回の解析による PREM モデルの推定値は、全ての天頂角でデータとよく一致しており、今回のテスト解析で用いた手法が、十分将来のフルサイズ IceCube の解析にも適用可能であると言える。

4. 今後の展望

図4は、今回用いたイベントの選別方法と解析方法をそのままフルサイズ IceCube に適応し、10年間データ取得した場合に得られると予想されるイベント数の見積もりを示す。この場合、PREM と FLATCORE

では、もっとも垂直のイベントで数十イベントの差がみられると予測されるため、統計誤差にして約1シグマの分離性能が期待できる。この値は目標値よりかなり悪いが、これは主に半分のサイズの検出器用に最適化したイベント選別フィルターを用いているためであり、今後フルサイズのIceCube用に最適化したフィルターを用いることによって、分離性能は大幅に上昇すると考えられる。

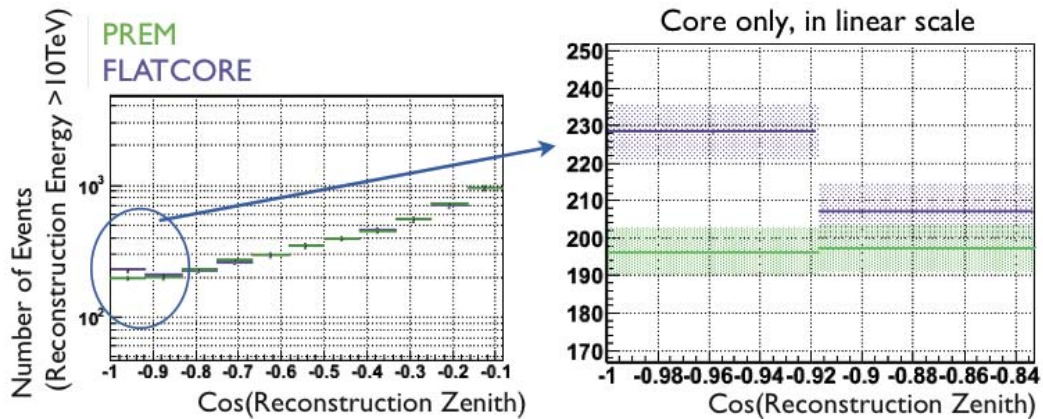


図3 IC40のイベント選別フィルタ及び解析方法を用いて見積もった、フルサイズIceCube(IC86)の10年間のデータによるPREMモデルとFLATCOREモデルの分離性能。アミ点部分は、シミュレーションの統計数からくる中央値の統計誤差を示す。

今後は、イベント選別フィルタの最適化の研究に加え、大気ニュートリノモデルの天頂角方向の誤差の研究、季節変化による大気ニュートリノモデルの変動、及びニュートリノの反応断面積の誤差を考慮に入れた系統誤差の見積もりを行う予定である。また、分離性能を上げるため、エネルギー再構成の分離性能を今以上に向上する研究、検出器の系統誤差の研究も引き続き行う予定である。

参考文献

[1] M. C. Gonzalez-Garcia, F. Halzen, M. Maltoni, and H. K. M. Tanaka, Phys. Rev. Lett. 100, 061802 (2008).
 [2] A. M. Dziewonski and D. L. Anderson, Physics of the Earth and Planetary Interiors 25 (1981) 297.